



УДК 681.5.015

7.6. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

METHODS OF IDENTIFICATION PARAMETERS AND STATE OF AC - ELECTROTECHNICAL COMPLEXES MINING SHOVELS

Осипов Павел Андреевич, аспирант каф. электрификации горных предприятий ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: osipov.pavel_vkt@mail.ru. Тел.: +79193834743

Карякин Александр Ливиевич, д-р техн. наук, заведующий каф. электрификации горных предприятий ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. E-mail: karyakin.a@ursmu.ru. Тел.: 8 (343) 257-66-48

Pavel A. Osipov, postgraduate, Ural State Mining University, 620144, Kuibyshev street, 30, Ekaterinburg, Russia. E-mail: osipov.pavel_vkt@mail.ru. Ph.: +79193834743

Alexander L. Karyakin, Doctor Sc., Ural State Mining University, 620144, Kuibyshev street, 30, Ekaterinburg, Russia. E-mail: karyakin.a@ursmu.ru. Ph.: 8 (343) 257-66-48

Аннотация: Статья посвящена вопросам анализа методов идентификации параметров и состояния электроприводов переменного тока. Сравниваются прямые и косвенные способы измерения массы породы в ковше карьерных экскаваторов. Приводятся методы идентификации момента нагрузки электроприводов с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором на основе градиентного поиска минимума функции, фильтров с конечной импульсной характеристикой, наблюдателей, оптимальной фильтрации Калмана и искусственных нейронных сетей.

Abstract: Article is devoted to the analysis of identification methods parameters and state of AC electric drives. Compares the direct and indirect measuring methods the mass of rocks in the bucket mining shovels. The methods of identifying the load torque of electric drives with asynchronous motors with squirrel-cage rotor based on gradient search of minimum functions, filters with finite impulse response, observers optimal Kalman filtering and artificial neural networks.

Ключевые слова: карьерный экскаватор; электроприводы переменного тока; измерение массы породы в ковше; идентификация параметров и состояния.

Key words: mining shovel; AC drives; measurement mass of rock in the bucket; state and parameters identification.

ВВЕДЕНИЕ

В мире наблюдается тенденция роста потребления основных полезных ископаемых, которая обуславливает увеличение объема их добычи. Горнодобывающие предприятия России разрабатывают месторождения полезных ископаемых в основном открытым способом с использованием карьерных экскаваторов. Экскаваторы в горнодобывающей отрасли имеют степень физического износа свыше 60% и нуждаются в модернизации или замене на новые [1]. Также имеется необходимость повышения производительности и эффективности использования карьерных экскаваторов.

Современные карьерные экскаваторы ведущих мировых производителей (P&H Mining Equipment Inc., Caterpillar Inc., Taiyuan Heavy Industry Co., ОАО «Объединенные машиностроительные заводы»

(ОАО «Уралмаш», ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»)) оснащаются электроприводами переменного тока главных механизмов с системами векторного (FOC) и прямого управления моментом (DTC) на основе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АДКР) [2, 3, 4, 5, 6], которые превосходят по показателям надёжности и экономичности электроприводы постоянного тока (ДПТ) с различными управляемыми преобразователями – генератором (Г), тиристорным (ТП) и транзисторным (ТрП) преобразователями (рис. 1).

Повысить производительность карьерного экскаватора возможно путем организации обратной связи между машинистом и процессом экскавации. С этой целью экскаватор оснащают информационно-диагностической системой (ИДС), одним из основных показателей которой является масса горной породы в ковше.

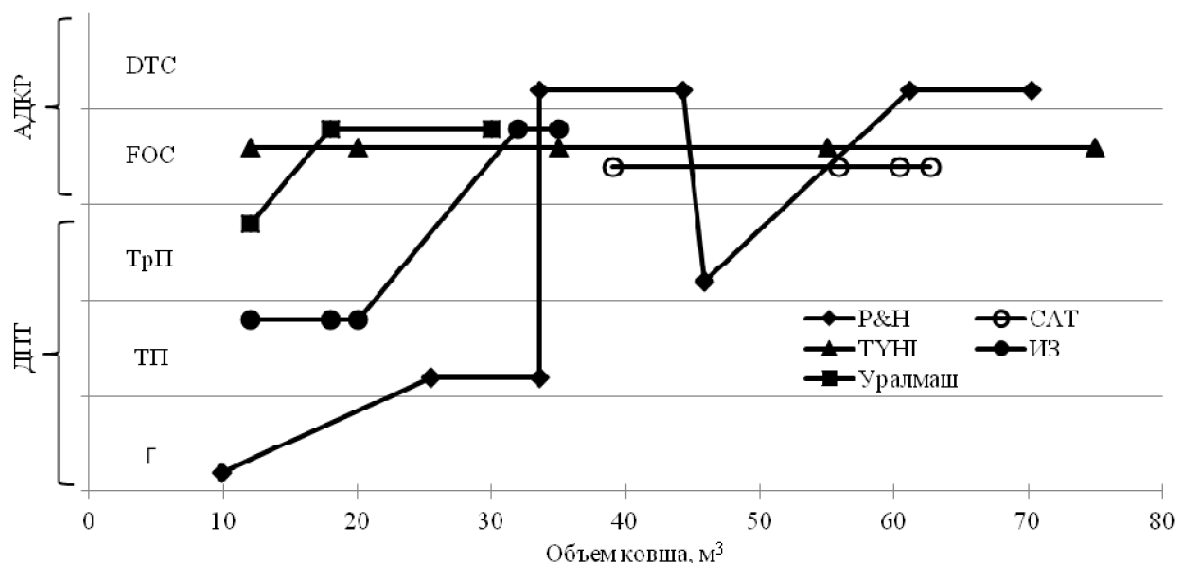


Рис. 1. Типы главных электроприводов карьерных экскаваторов ведущих мировых производителей

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ПОРОДЫ В КОВШЕ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Массу горной породы можно вычислить посредством измерения объема загрузки ковша или усилий в рабочем оборудовании. Объем загрузки ковша измеряется ультразвуковыми или лазерными датчиками, которые устанавливаются на рабочем оборудовании экскаватора. В пределах забоя экскаватора значения удельной массы и коэффициенты разрыхления горной породы изменяются, что обуславливает наличие неконтролируемых погрешностей данного метода измерения. Установка дополнительных датчиков на рабочем оборудовании экскаватора снижает надежность и ухудшает эксплуатационные характеристики таких систем.

Измерение усилий в рабочем оборудовании может быть произведено прямыми и косвенными методами. Прямые методы основаны на использовании датчиков усилия в канате или механического момента на валу механических передач. Измерение усилия в канате позволяет избавиться от необходимости учитывать коэффициенты полезного действия механических передач, но требует установки датчиков на опору оси головного блока стрелы и учета изменения положения ковша. Датчики усилия должны иметь диапазон измерения усилия, учитывающий ударные нагрузки при копании и, следовательно, имеют увеличенную погрешность в диапазоне нагрузок, создаваемых массой горной породы в ковше.

Механический момент можно измерить на валу между электродвигателем и редуктором или редуктором и барабаном подъемной лебедки. Способ позволяет демпфировать с помощью подъемных канатов и механических передач

ударные нагрузки при копании, улучшить условия работы и обслуживания датчиков благодаря установке их в кузове экскаватора, но предполагает учет изменения коэффициентов полезного действия механических передач.

В итоге, прямые способы измерения предполагают наличие дополнительных датчиков, учет геометрии рабочего оборудования и выделение составляющей массы породы в ковше.

В косвенных методах измерения усилия в рабочем оборудовании определяются посредством сигналов электропривода, как правило, получаемых с использованием имеющихся датчиков системы управления электроприводом. Необходимо учитывать геометрию рабочего оборудования, механические передачи и выделять составляющую усилия массы горной породы в ковше.

ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ПОРОДЫ В КОВШЕ

Компания P&N Mining Equipment Inc. для карьерных и шагающих экскаваторов предлагает прямые и косвенные методы измерения массы горной породы в ковше [2]: прямой метод на основе измерения усилия в подъемном канате тензометрическими датчиками, расположенными на опоре оси головных блоков стрелы (система Payload Pin); косвенный метод посредством сигналов электропривода подъема (система Payload).

Компания Caterpillar Inc. использует косвенный метод измерения массы породы в ковше карьерных экскаваторов с помощью сигналов электропривода подъема (система AccuLoad) [3]. Погрешность измерения массы горной породы в

ковше системой AccuLoad составляет $\pm 4\%$ для более чем 90% циклов погрузок.

Анализируя методы измерения горной породы в ковше, можно сделать вывод о перспективности косвенных методов измерения на основе сигналов электропривода, для которых необходимо вычисление статического момента электропривода. Поэтому возникает задача идентификации параметров и состояния электроприводов переменного тока с АДКР и векторной системой управления.

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОМЕНТА СТАТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Классический подход к идентификации момента статического сопротивления заключается в решении основного уравнения движения электропривода:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1)$$

Основной проблемой данного способа является необходимость вычисления производной угловой частоты вращения двигателя, что приводит к усилению высокочастотных составляющих шумов.

В работе [7] предлагается реализовать операцию взятия производной с помощью цифрового фильтра дифференциатора с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) с весовой функцией:

$$\omega(n) = \frac{8\pi F_c \cdot n \cdot \cos \varphi - 4\pi \cdot \sin \varphi}{8\pi^2 \cdot n^2}, \quad (2)$$

$$\varphi = 2\pi n \cdot F_c,$$

где F_c – частота среза; $n=1 \dots N$; N – размер окна. КИХ-фильтр в области высоких частот имеет коэффициент передачи близкий к нулю и на низких частотах является дифференциатором. Весовая функция фильтра ограничивается по времени умножением на оконную функцию Хэмминга:

$$\omega_H(n) = \alpha + (1 - \alpha) \cos\left(\frac{8\pi n}{N}\right),$$

$$\begin{cases} n \text{ при } -\frac{N-1}{2} \leq n \leq \frac{N-1}{2}, \\ 0 \text{ при других } n. \end{cases} \quad (3)$$

Недостатком данного метода является накопление погрешностей оценок других координат в значении момента сопротивления, наличие операции дифференцирования скорости и высокая чувствительность к изменению момента инерции.

Идентифицировать состояние и параметры АДКР возможно непрерывным градиентным методом поиска минимума функции [8]. Метод позволяет определить сопротивления и индуктивности Т-образной схемы замещения АДКР, суммарный момент инерции и момент статического сопротивления. Для уравнений математической модели АДКР в осях d-q системы координат связанной с ротором составляются уравнения невязок и функции невязок, значения которых минимизируются:

$$V_{u_i} = \frac{1}{2} \left[(\Delta u_{id})^2 + (\Delta u_{iq})^2 \right],$$

$$V_m = \frac{1}{2} (\Delta M)^2. \quad (4)$$

Достоинством метода является возможность оценки множества параметров и переменных АДКР с высокой точностью, недостатком – время идентификации более десятков секунд.

В работе [9] развивается подход астатических наблюдателей нагрузки электропривода, синтезированных с использованием распределения корней характеристического уравнения по Бесселю. В рамках подхода рассматриваются полные и редуцированные формы наблюдателей нагрузки с астатизмом первого, второго порядка и заданием полосы пропускания частот для оценки скорости и момента сопротивления. Достоинством подхода является компенсация нулей передаточных функций при ненулевых начальных условиях и действии внешних возмущений, быстрота и точность получения оценки момента статического сопротивления.

Использование фильтра Калмана в бездатчиковом векторном электроприводе с АДКР позволяет оценить вектора состояния переменных потокоцепления ротора, скорости и электромагнитного момента [13]. Погрешность оценки переменных не превышает 5% в динамическом и 1% в установившемся режиме работы. В работе [12] фильтр Калмана применяется для оценки в реальном времени параметров и состояния электропривода постоянного тока: активных и индуктивных сопротивлений якоря и обмотки возбуждения, тока якоря, тока обмотки возбуждения. Результаты моделирования показывают погрешность оценки токов, активных сопротивлений и индуктивности взаимной индукции ниже 3% и высокую погрешность до 26% оценки индуктивностей якоря и обмотки возбуждения.

Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) в качестве идентификаторов состояния и параметров ЭТК [10, 11] коренным образом

отличаются от классических методов идентификации и наблюдателей. Синтез ИНС заключается в выборе структуры и настройки весовых коэффициентов по априорной информации об объекте. В работе [11] предлагается ИНС Элмана для идентификации коэффициентов передаточной функции линейной модели двухмассовой механической системы с электроприводом постоянного тока. Обучение ИНС производилось с учетом изменения коэффициентов $\pm 50\%$ от расчетных и с объемом выборки 200 отсчетов. В результате погрешность оценки отдельного коэффициента системы не превышала 6%.

Прогнозирование нестационарной нагрузки производилось с помощью частично-рекуррентной сети Элмана и радиальной базисной сети [10]. Погрешность оценки кривой нагрузки момента радиальной базисной сетью составила 2,24%, что в 6 раз меньше по сравнению с сетью Элмана. Однако для больших размеров обучающих множеств точность прогноза сетью Элмана снижается. Широкое применение метода ИНС ограничивает сильное влияние на точность идентификации нелинейностей объекта моделирования и помех, а также необходимость обучения сети по априорным данным ЭТК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате рассмотрения методов идентификации момента нагрузки электропривода переменного тока для экскаваторных ИДС наиболее перспективен наблюдатель нагрузки и фильтр Калмана. В дальнейшем планируется сравнение данных методов идентификации на экспериментальных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. URL: <http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy/> (дата обращения: 01.05.2015).
2. Официальный сайт компании P&H Mining Equipment Inc. [Электронный ресурс] URL: <http://www.phmining.com/> (дата обращения: 01.05.2015).
3. Официальный сайт компании Caterpillar Inc. [Электронный ресурс] URL: <https://mining.cat.com/> (дата обращения: 01.05.2015).
4. Официальный сайт российского дилера компании Taiyuan Heavy Industry Co. фирмы ООО «ТЗ-АВИК Сервис» [Электронный ресурс] URL: <http://tz-avic.ru/> (дата обращения: 01.05.2015).
5. Официальный сайт компании ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» [Электронный ресурс] URL: <http://iz-kartex.com/> (дата обращения: 01.05.2015).
6. Официальный сайт компании ОАО «Уралмаш». [Электронный ресурс] URL: <http://www.uralmash.ru/> (дата обращения: 01.05.2015).
7. Завьялов, В. М. Оценка состояния многомассовых механических систем с применением цифровой фильтрации / В. М. Завьялов, А. В. Нестеровский, Д. О. Мефферт // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. - №5. - С. 79-81.
8. Макаров, В.Г. Идентификация параметров и токов ротора трехфазного асинхронного двигателя / В.Г. Макаров, Яковлев Ю.А. // Вестник Казанского государственного технического университета. – 2011. - №6. - С. 134-144.
9. Колганов, А. Р. Редуцирование наблюдателей нагрузки для электропривода с векторным выходом / А.Р. Колганов, С. К. Лебедев, Н. Е. Гнездов, А. А. Коротков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. - №1. - С. 79-83.
10. Браславский, И.Я. Анализ различных типов искусственных нейронных сетей для прогнозирования статических нагрузок в электроприводе / И.Я. Браславский, А.В. Костылев, Д.В. Есаулкова // Труды XIV международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – 2012. – С. 73-76.
11. Анисимов, А. А. Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А. А. Анисимов, М. Н. Горячев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. - №3. - С. 55-58.
12. Гаргаев, А. Н. Применение фильтра Калмана для динамической идентификации двигателей постоянного тока. / Гаргаев А. Н., Каширских В. Г. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. №1. – С. 128-130.
13. Ланграф С. В. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением / Ланграф С. В., Глазырин А. С. // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №6. – С. 61-64.